

氣候條件對全球糧食作物生產影響 —縱橫資料模型的應用

許家勝^{*}、何耀廷^{**}、陳吉仲^{***}

研究文獻顯示氣候變遷會影響糧食作物之生產，進一步對全球糧食供給造成衝擊，但未考量到氣候條件門檻對作物產量的影響。本研究為探討氣候變遷及其門檻對作物產量之影響，以糧食作物玉米及小麥為實證案例，分別探討氣候條件包括氣溫、乾旱指數、濕度指數對作物產量之影響。本研究應用縱橫資料模型（panel data model）與縱橫資料門檻模型（panel threshold model）進行實證分析，首先為應用縱橫資料模型估計各氣候條件對作物產量的影響，接著再以縱橫資料門檻模型探討玉米產量、小麥產量與氣溫間之非線性關係，並以氣溫為門檻變數，進一步觀察在不同溫度門檻下，各氣候因素對作物產量之影響。

實證結果顯示乾旱指數和玉米、小麥產量為正向之關係，亦即在越不乾旱之氣候條件下越有利於玉米和小麥的生產；而濕度指數對於兩者產量則有負面之影響，亦即產季之氣候越潮濕越不利於玉米和小麥的生產；氣溫對於兩者產量亦為負面之影響，亦即溫度越高越不利於玉米和小麥之生產。此外，氣溫對於玉米產量之影響存在三個門檻溫度，而氣溫對於小麥產量之影響則存在單一門檻溫度，且氣候條件在不同之溫度區間對玉米和小麥產量有著不同程度之影響。此亦顯示估計氣候條件對作物產量的影響必須考量到門檻效果之影響。

關鍵詞：氣候變遷、糧食作物、乾旱指數、縱橫資料門檻模型

* 國立中興大學應用經濟學系博士生。

** 安禾國際投資有限公司投資研究部執行副總經理。

*** 國立中興大學應用經濟學系教授。本文之通訊作者，Email: mayjune@nchu.edu.tw。

I、前 言

世紀工業革命以來，人類多樣活動使得大氣中充滿各類天然與人為製造的溫室 19 效應氣體（如 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 等），進而增強大氣的溫室效應，其結果導致地球的溫暖化，同時加速全球氣候的變遷（楊純明，2007），聯合國跨國氣候變遷委員會（The Intergovernmental Panel on Climate Change，以下簡稱 IPCC）更指出自 1980 年以來，全球氣溫持續上升且許多地區甚至觀察到更大幅度之溫度變化（IPCC，2007），而 Tao 等人（2006）亦說明未來會加速全球氣溫暖化之趨勢。美國大氣研究中心（National Center for Atmospheric Research，以下簡稱 NCAR）認為即使是些微之全球平均溫度改變，都可能造成區域熱浪之形成，同時更溫熱之大氣溫度可能會促使形成高強度之暴風雨、極端降雨及極端降雪、海平面上升以及發生嚴重乾旱之氣候等氣候事件，而此等氣候事件造成之自然災害影響層面甚廣（NCAR，2015a）。

此外，氣候變遷亦對於各式物種產生系統性之影響，生物有可能因為氣候變遷而導致生存環境之改變，進一步對物種存續造成威脅。因此氣候變遷對於自然生態系統及人文環境之潛在影響確實不容小覷，其已成為人類社會欲維持永續發展所面臨之重大挑戰，而其中尤以農業部門受氣候變遷影響最為嚴重（Motha & Baier，2005；Salinger，2005；Easterling *et al.*，2000；Wuethrich，2000）。

就農業部門而言，氣候變遷可能會造成乾旱及洪水等自然災害，進一步影響糧食生產，尤其在農業為主要產業之國家，持續之乾旱將導致農業用水之減少而造成水資源短缺，將使得農業生產蒙受龐大損失（Howitt *et al.*，2014）。IPCC 在 2014 年於日本橫濱召開第五次氣候評估報告（Assessment Report 5，AR5），並於該會議報告明確指出：「氣候變遷正衝擊糧食與人類

安全。」，有些研究結果亦顯示氣候變遷將影響農產品供應，對未來世界糧食供給體系之穩定性產生嚴重威脅，因此對於未來之糧食價格亦有關鍵性之影響（Leclère *et al.*, 2014；Parry *et al.*, 2004）。

然而，氣候變遷對糧食安全的影響，亦將帶動人類對氣候變遷的適應行為，促成全球糧食供應體系的調整。如糧食作物管理作業的改變、調整農業活動的專業化與定位，且將影響國際貿易流動與農產品消費水準，並帶動農業專業性的研究發展（Antle & Capalbo, 2010）。如 Tompkins 等人（2005）於英國新農業部（Department for Environment Food & Rural Affairs, DEFRA）的報告中提出，可改變易受乾旱影響地區的土地使用，以及投資雨水儲水設備等，Iglesias 等人（2007）則針對氣候變遷進行管理風險，如降低氣候變遷對環境、經濟、社會的潛在影響。

綜上所述，探討氣候變遷對作物產量的影響之議題已被許多的相關文獻加以分析，顯示個別氣候因素對作物之產量影響並非為一固定值，亦即氣候條件與作物產量之間應為非線性關係，如溫度對作物產量的影響並非為一固定之正值或者負值，而可能是在不同溫度條件下會對作物產量造成不同程度之影響，因此應以非線性關係估計各氣候因子對作物產量之影響。然而我們認為一般非線性函數型式較無法完整呈現各氣候因子與作物產量之非線性關係，例如二次函數雖能藉由估計轉折點以分析轉折點前後估計係數之改變，但氣候因子影響作物產出之轉折點可能不僅一個，因此模型將無法完整說明各氣候因子對作物產量之非線性影響；同樣雙對數（double log 或 Cobb-Douglas）函數之估計方程式亦無法達到目的。而應用門檻模型可透過計量方法檢定出確切之門檻數量，相較於非線性之函數型式可更清楚說明各氣候條件與作物產量之非線性關係。

此外，氣候門檻議題涵蓋多個層面，例如 Chen、Chen 與 Chang（2011）探討氣溫門檻改變對死亡率之影響；Lee 與 Chiu（2011）分析在不同氣溫門檻下氣溫變化對電力需求之影響，而氣候變遷會對農業部門之生產造成影

響，進而影響全球糧食之供給，因此若能藉由門檻模型分析氣候因子與作物產出之非線性關係，將能提供更多訊息做為未來研擬相關政策或是後續相關研究之參考，此亦說明氣候門檻為一值得探討之議題。

故本研究將以世界之主要糧食作物玉米及小麥為實證案例，以計量方法分別估計氣候條件包括氣溫、乾旱指數及濕度指數等對於全球玉米及小麥之產出影響。本研究將分別應用縱橫資料模型 (panel data model) 與縱橫資料門檻模型 (panel threshold model) 進行實證分析，首先為應用縱橫資料模型估計各氣候條件對作物產量的影響，接著再以縱橫資料門檻模型探討玉米產量、小麥產量與氣溫間之非線性關係，並以氣溫為門檻變數，進一步觀察在不同溫度門檻下，各氣候條件對作物產量之影響。

II、相關文獻回顧

糧食作物的產量受到許多因素交互影響，分為人為控制之非氣候因素與不可控制之氣候因素。人為因素有糧食作物的品種培育、施肥、灌溉、耕作等，而氣候因素則包括：(1) 平均氣候的改變：如溫度、降水；(2) 氣候變異及極端氣候事件，如極端氣溫、豪大雨及洪水、乾旱以及熱帶風暴等 (Gornall *et al.*, 2010)。本研究將氣候條件列舉為溫度、降水、乾旱、極端氣候事件直接影響農作物之予以討論，如下所述。

2.1 溫度因素

在世界糧食生產資源正承受著全球人口急遽成長的壓力下，氣候變遷對農業生產之影響為一急需被迫切探討之重要議題，尤其是溫度及其變化對農業的影響，更是與人類生存所倚賴的糧食生產息息相關。Battisti 與 Naylor (2009) 之研究結果指出在作物生長之季節當中，較高的氣溫會顯著影響農

作物之產量，進而影響農業收入以及糧食安全。Tao 等人（2006）則分析中國在 1981 年至 2000 年間，玉米、小麥、稻米三種主糧食作物的產量與氣溫關係，其研究結果發現大部分觀測站具有明顯溫度增加的趨勢，而氣溫暖化對糧食作物之產量產生負面影響。Lobell 與 Field（2007）則指出在某些中高緯度地區，氣候暖化可能會提高作物之產量，而同時在低緯度地區氣候暖化則會減少作物之產量，儘管如此，兩者綜合觀之仍顯示氣候暖化對於作物之生長有顯著影響。

Gornall 等人（2010）則發現在中緯度地區，氣溫變暖 2°C ，小麥產量將增加約 10%，而在低緯度地區，氣溫變暖 2°C 則反而使小麥產量減少 10%，此結果顯示出同一作物在不同地區，氣候暖化對其產量之影響不盡相同。此外，若原本種植作物之地區氣溫為趨近於農作物物理性最大限度的地區，如有季節性乾旱氣候地區或者熱帶地區，則溫度升高可能會對作物造成立即的損害。Porter 等人（2014）亦指出在緯度較低之地區，局部地區之氣溫升高幅度於 2°C 以內，就會導致該地區主要農產品的產量減少，一旦全球範圍之氣溫升高，更將造成全球性嚴重的農作物產量減損。

Lobell 與 Asner（2003）針對美國 1982 年至 1998 年間環境因子對大豆產量進行研究，其結果發現溫度會顯著影響大豆產量，亦即溫度為影響大豆產量之重要環境因子。Lobell 與 Field（2007）發現全球玉米、小麥、大麥之產量與氣溫暖化呈現負向關係，並估計自 1981 年暖化已造成每年 4 千萬噸或 50 億美元的損失。Peng 等人（2004）則指出在菲律賓，當乾旱季節（一月至四月）之最低溫度每上升 1°C ，將導致稻米產量減少 10%。

溫度與時間、空間、降水、濕度等其他氣候條件存在著交互影響的作用，許多學者進一步透過非線性模型探討氣候變遷的影響。Lobell 等人（2011）分析非洲從 1999 年至 2007 年超過兩萬筆玉米實驗資料，發現氣候暖化與產量呈現非線性關係，在降水充足的條件下，日氣溫超過 30°C 時，氣溫每增加 1°C ，玉米產量將降低 1%，在乾旱條件下，氣溫每增加 1°C ，則

玉米產量會降低 1.7%。

Schlenker 與 Roberts (2009) 亦發現溫度與作物產出呈非線性及非對稱關係，其結果指出美國之玉米、大豆、棉花等作物在 29°C 至 32°C 之溫度區間以下，產量將隨溫度增加而增加，若溫度升高至 29°C 至 32°C 之溫度區間以上，則會對這些作物產量造成明顯之損害。Chen、McCarl 與 Schimmelpfennig (2004) 針對美國主要作物做研究，發現溫度顯著影響作物的產量。其結果顯示在以 Cobb-Douglas 函數建立之作物生產模型中，若溫度升高，則玉米、棉花、高粱、小麥等作物產量將隨之減少；而在一般線性之作物生產模型中，結果則顯示大豆產量會隨溫度升高而減少。

綜上所述，過去文獻之結果顯示溫度的增加對農作物產量之影響有正亦有負，而可確信之結果為氣溫因素會顯著影響農作物之產量，而不同之溫度區間亦有可能對同一種作物產量產生不同之影響。另外從這些溫度對作物產量的影響文獻整理中，發現這些影響其實是會隨著溫度水準的改變而改變，亦即溫度對作物產量的影響不是固定不變，故找出合適的溫度門檻值，再針對不同的門檻評估溫度對作物產量的影響，然而此部分文獻極少，而這亦是本文之研究重點及貢獻。

2.2 降水因素

水對於植物生長至關重要，因此不同的降水型態對農業皆存在顯著的影響，而對於未來降雨改變的預測，將會影響農業應對氣候變遷所造成之降水改變的調整能力 (Gornall *et al.*, 2010; Reilly *et al.*, 2003)。

IPCC (2007) 預測未來高緯度地區降水將增加 (尤其冬季)，熱帶、亞熱帶地區降水則將減少，而降雨季節降水量的改變相較於年平均降水量的改變，對農業有著更為關鍵的影響 (Christensen *et al.*, 2007)，如印度農業高度依賴其雨季之降雨量，因此看一整年之年均降雨量對其農業之影響則較不具意義 (Kumar *et al.*, 2004)。

儘管水為植物生長不可或缺的元素之一，然而過多的水也會影響糧食作物之生產。朱蘭芬、陳吉仲與張靜貞（2003）研究發現台灣稻米在收割前三個月份時，過多的雨量會減少稻米的產出，但在稻米剛播種時的豐富雨量則對稻米產出有正面的影響；Chen、McCarl 與 Schimmelpfennig（2004）發現降水與作物產量呈正向顯著的關係，若降水增加，美國玉米、棉花、高粱作物產量將隨之增加，而大豆及小麥隨降水增加而減少。另外，降水並非影響水供應的唯一因素，因為氣溫上升以及更長的作物生長季節，都將導致更多的蒸發量，使得 70 年代與 80 年代全球作物所需灌溉增加了 5% 及 20%，甚至更多（Doll & Siebert, 2002），其他地區性研究如中東與北非之灌溉需求將增加（Abou-Hadid *et al.*, 2003）；東南亞灌溉需求增加約 15%（Arnell *et al.*, 2004）；而中國灌溉需求減少（Tao *et al.*, 2006）。

2.3 乾旱

近年來許多研究顯示，世界各地發生乾旱情形日益嚴重，Dai、Trenberth 與 Qian（2004）研究發現氣候變遷已造成部分地區面臨乾旱，結果指出從 1970 年至 2000 年，全球嚴重乾旱地區面積增加超過一倍；1950 年代北半球陸地呈現明顯的乾旱趨勢，1970 年代南半球陸地相對濕潤，而 1960、1990 年代則相對乾旱；1980 年代前期乾旱面積大幅度增加，1965 至 1995 年期間極端乾旱事件機率明顯增加，且撒哈拉、亞洲東部、南非等地區乾旱情形更趨嚴重，這種乾旱趨勢加劇的主因為降水的減少與氣溫升高所致。乾旱影響糧食生產，進一步導致飢荒，容易為人類帶來傳染性疾病（Khasnis & Nettleman, 2005），造成火災意外的增加，及地下水的過度開發，而在熱帶乾旱及沙漠地區的貧窮發展中國家，也因反覆乾旱而缺乏水資源且極端的貧窮（Khor, 2008）。

IPCC（2007）亦指出南亞國家一些依賴降雨之農場，若乾旱持續發生，至 2050 年之主要作物產量可能減少 30% 之產量。Howitt 等人（2014）研究

發現乾旱導致美國加州水資源短缺，將進一步導致價值 8.1 億美元之農作物產值損失、2.03 億美元之乳酪業產值損失及其他家畜的損失，另外，農業因地表水減少而超抽地下水所造成之環境損失為 4.54 億美元。這些乾旱造成之農業經濟損失為 15 億美元，而 2014 年加州因乾旱的總經濟成本為 22 億美元，此外，乾旱還造成 17,100 個季節性及兼職工作的經濟損失。

Howitt 等人 (2014) 亦指出無論是否有聖嬰現象，乾旱可能會持續至 2015 年，若乾旱再多蔓延兩年，為會因應地表水的不足供應農業使用，則超抽地下水會變成彌補不足之地表水供給之主要來源，造成地下水的耐受力下降及水位下降，因此持續的乾旱將使得農業生產之成本愈來愈高。

本研究利用乾旱指數 (Palmer Drought Severity Index, 以下簡稱 PDSI) 來描述世界乾旱情形，乾旱指數因具有嚴謹的系統性，各項因素考慮周全，綜合了水分缺乏量與持續時間因素對乾旱程度的影響，並將前期天氣條件納入考量，能合理描述乾旱的各項特點，為一種被廣泛應用的乾旱指標 (Burke、Brown & Christidis, 2006)。綜合 2.2 及 2.3 小節之說明，可知降水及乾旱為長期影響作物生長之重要因素，因此後續之實證分析將以濕度指數及乾旱指數表示降水及乾旱對作物產出影響之代表變數。

2.4 極端事件 — 暴風雨及洪水

氣候變遷導致極端氣溫、乾旱、暴風雨、洪水等氣候事件的增加，對農業造成極度嚴重的衝擊。豪大雨導致洪水，能摧毀廣大面積的農作物，過多的水也可能造成其他影響，如土壤過濕、厭氧性、並抑制植物的生長，亦間接影響農場的運作；Kettlewell、Sothorn 與 Koukkari (1999) 發現暴雨將會導致英國作物發芽時感染真菌病，而降低作物的質量；Gornall 等人 (2010) 研究發現，CO₂ 濃度加倍將增加歐洲大部分地區的降雨強度，據預測，未來許多重要農業區域降雨強度將增加達 25%，且暴雨事件的頻率似乎在增加中，而氣候的持續暖化，使得此趨勢將延續下去。

強烈的熱帶氣旋最高風速可達 74 英里以上，也就是北太平洋東部與北大西洋所稱的「颶風」，北太平洋西部所稱的「颱風」，最強烈的熱帶氣旋可以達到 190 英里，此為 1979 年 10 月北太平洋西部所創下的紀錄（Gornall *et al.*, 2010）。朱蘭芬、陳吉仲與陳星瑞（2007）針對颱風對台灣稻米產量的影響進行研究，發現當風速增強 1%，對稻米單位產出損失約為 0.9% 至 6.7%，而累積雨量增加 1%，則單位產出損失 0.2% 至 3.8%。此外，Gornall 等人（2010）依據 1945 年至 2008 年間觀察到熱帶氣旋之路徑，發現最脆弱的農業區域包括美國、中國、越南、印度、孟加拉、緬甸以及馬達加斯加，而 2000 年時，颶風造成馬達加斯加 149,441 公頃的稻米、5,000 公頃的玉米及 155,000 公頃的穀物的損失。儘管許多研究聚焦於暴風的負面影響，熱帶氣旋還是會對部分地區之降雨量帶來益處，在許多乾旱地區，每年降雨有一大部分來自於此，據估計，熱帶氣旋供應南佛羅里達州每年降雨的 15% 至 20%（Walther & Abtew, 2006）。

III、實證方法及實證步驟

本研究之實證模型包括：（1）縱橫資料模型（panel data model）；（2）縱橫資料門檻模型（panel threshold model）。因此本節將分別針對此二種模型之理論方法，以及實證模型之建立進行說明。

3.1 縱橫資料模型（panel data model）

本研究所選取的資料為美國、中國、巴西、墨西哥、印度、阿根廷等國家 1978 年至 2011 年玉米作物各項資料，以及中國、印度、美國、法國、加拿大等國家 1973 年至 2011 年小麥作物各項資料，為兼具時間維度與橫斷面之縱橫資料，因此在計量模型上適合採用縱橫資料模型，依過去文獻敘述各

項氣候因素對農作物產出之影響，在估計農作物生產函數時本應考量農家之資本及勞動等要素投入因素對農作物生產之影響，然而考量政府公告之資料並非個別農家之要素投入數據，以及本研究之農作物產出為單位面積之作物產出，因此生產模型採用式(1)之設計，而式中之時間趨勢則代表生產函數中要素投入和產出間的技術關係 (Just & Pope, 1979)，另外式(1)亦可估計出氣候條件對生產的影響。因此建立實證模型如式(1)：

$$y_{it} = \mu_i + \beta_1 Temp_{it} + \beta_2 PDSI_{it} + \beta_3 Humidity_{it} + \beta_4 Trend + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

其中 y_{it} 為第 i 國於第 t 年之每公頃作物產量 (公噸)； μ_i 為個別效果項； $Temp_{it}$ 為第 i 國於第 t 年作物產季月份之平均氣溫 ($^{\circ}\text{C}$)； $PDSI_{it}$ 為第 i 國於第 t 年作物產季之平均乾旱指數； $Humidity_{it}$ 為第 i 國於第 t 年作物產季之相對濕度指數； $Trend$ 則為時間趨勢項；而 ε_{it} 為估計式之殘差項。

縱橫資料模型會依據資料截距項之不同特性，產生混合最小平方法 (pooled OLS)、固定效果模型 (fixed effect) 及隨機效果模型 (random effect) 等三種不同截距項模型 (黃台心, 2009)，對此，可透過相關統計量檢定進行分析，作為最適模型選擇之依據。就比較產生混合最小平方法與固定效果模型而言，可依 F 檢定之結果作為模型之選擇依據，其為檢定個群組之截距項是否相等，其檢定之虛無假設為所有群組之截距項皆相等，因此若檢定結果拒絕虛無假設，則表示模型中應包括個別群組之截距項，故採用固定效果模型進行估計較為適宜。

就比較產生混合最小平方法與隨機效果模型而言，可應用 Breusch 與 Pagan (1980) 提出之 Lagrange Multiplier (LM) 檢定。隨機效果模型假設截距項為一隨機變數，故該模型係強調資料整體之關係，而非個別群組之間之差異，故 LM 檢定為檢定模型之截距項是否具隨機性。其虛無假設為截距項之變異數為零，亦即無隨機性，因此檢定結果若不拒絕虛無假設，建議採用混合最小平方法。

就比較產固定效果模型與隨機效果模型而言，則應用 Hausman (1978) 提出之 Hausman 檢定來檢測個別效果與解釋變數間是否具有相關性，其虛無假設為個別效果項為外生變數，因此若檢定結果拒絕虛無假設，則表示個別效果會受解釋變數數值之大小影響，亦即具內生性。因此若檢定結果不拒絕虛無假設，表示截距項與解釋變數間不具有相關性，此時可採用隨機效果模型，反之，若拒絕虛無假設，表示截距項與解釋變數間具有相關性，此時若採用隨機效果模型會產生偏誤情形，因此建議採用固定效果模型。

3.2 縱橫資料門檻模型 (panel threshold model)

Tong (1978) 提出門檻自我迴歸模型後 (threshold autoregression, TAR)，門檻自我迴歸模型就被廣泛運用於時間序列之分線性關係分析上，由於門檻模型可藉由統計檢定之方式以門檻變數模型之門檻值，可避免主觀判定資料可能結構轉變點之缺點。Hansen (1999) 提出縱橫資料門檻模型，其不但可應用縱橫資料之優勢，增加觀測數量以提升估計準確性，並可同時含括多個門檻於模型內，因此能更清楚分析不同門檻對估計結果之影響。考量本研究之資料特性，故以縱橫資料門檻模型估計在不同之氣溫門檻下，各氣候條件對農作物產出之影響。

接著本研究應用縱橫資料門檻模型 (Hansen, 1999) 探討氣溫及農作物產量之間是否存在非線性關係，若氣溫及農作物產量之間存在非線性之關係，則可應用門檻模型進一步估計不同溫度區間對農作物產量之影響。

依 Hansen (1999) 所提出之多門檻模型建立可能之氣溫及農作物產量模型如下：

$$\begin{aligned}
 Y_{it} = & \mu_i + (\beta_{11}Temp_{it} + \beta_{21}PDSI_{it} + \beta_{31}Humidity_{it})(Temp_{it} \leq \gamma_1) \\
 & + (\beta_{12}Temp_{it} + \beta_{22}PDSI_{it} + \beta_{32}Humidity_{it})(\gamma_1 < Temp_{it} \leq \gamma_2) \\
 & + (\beta_{13}Temp_{it} + \beta_{23}PDSI_{it} + \beta_{33}Humidity_{it})(\gamma_2 < Temp_{it}) + \beta_4Trend + e_{it} \quad (2)
 \end{aligned}$$

其中 μ_i 為截距項，亦表示個別群組對農作物產量影響之個別差異，例如每個國家存在地理位置與特殊氣候環境差異對作物產量之影響，而氣溫、乾旱以及濕度則為每個地區影響農作物產量之共同氣候因子，因此透過此修正方式，後續估計之結果可代表跨地區之共同氣候因子對農作物產量之影響。 $Temp_{it}$ 同時為此模型設定之門檻變數，亦為門檻相依變數 (regime dependent variable)，藉此以估計不同門檻溫度區間對於作物產量之影響； $PDSI_{it}$ 、 $Humidity_{it}$ 亦為門檻相依變數，其估計之係數會隨著不同之溫度區間而有所變動，而 Trend 則設定為門檻獨立變數 (regime independent variable)，不隨不同溫度區間之變動而改變其對於作物產量之影響。參數 γ_1 及 γ_2 則分別表示兩個不同之溫度門檻值，且 $\gamma_1 < \gamma_2$ ，而 e_{it} 為殘差項。在實際尋找門檻值時，會由 $Temp_{it}$ 之最小值當成初始門檻值，以計算其殘差平方和；接著逐步增加門檻值直至 $Temp_{it}$ 之最大值為止，再取最小殘差平方和之對應門檻值作為 γ_1 。

在得到門檻值 γ_1 後，則必須藉由統計檢定門檻是否存在，當確立門檻效果存在後，則表示可以門檻模型來探討氣溫及農作物產量之間的關係。Hansen (1999) 提出概似比 (likelihood ratio) 檢定以檢定模型是否存在門檻效果，其虛無假設為 $H_0: \beta_1 = \beta_2$ ，令 SSE_0 為固定效果消除後，無門檻變數下模型估計所得之殘差平方和，而 $SSE_1(\hat{\gamma})$ 則為單一門檻時模型估計所得之殘差平方和，則其概似比統計量 F_1 如式(3)：

$$F_1 = \frac{(SSE_0 - SSE_1(\hat{\gamma}))}{\hat{\sigma}^2} \quad (3)$$

檢定結果若無法拒絕虛無假設，則表示模型不具任何門檻效果，即以線性模型之方式呈現；反之，則顯示模型具有門檻效果，可以門檻模型呈現變數間之非線性關係。然而在無門檻效果之虛無假設下，門檻參數無法被辨認，造成檢定統計量之大樣本分配並非卡方分配，使其臨界值無法查表得知，因此 Hansen (1999) 建議以拔靴反覆抽樣 (bootstrap) 之方式，計算其大樣本分配之 P 值 (asymptotic P-value)。

當拒絕統計量 F_1 之虛無假設，則確立模型具有至少一個門檻效果，而其估計所得之門檻值 $\hat{\gamma}_1$ 則可假設為已知門檻，以其為基礎再進行第二個門檻效果檢定以及門檻值 $\hat{\gamma}_2$ 之尋找。 F_2 即為第二個門檻效果之檢定統計量，其虛無假設 H_0 ：模型只有一個門檻；對立假設 H_1 ：模型有兩個門檻。

$$F_2 = \frac{(SSE_1(\hat{\gamma}_1) - SSE_2(\hat{\gamma}_2))}{\hat{\sigma}^2} \quad (4)$$

其中 $\hat{\sigma}^2 = 1/N(T-1)SSE_2(\hat{\gamma}_2)$ ， SSE_2 為在固定第一門檻值下，模型有第二門檻之最小殘差平方和，而 γ_2 則為相對應之門檻值。若檢定結果不拒絕 F_2 ，則表示模型為單一門檻；若檢定結果拒絕 F_2 ，則顯示模型至少有兩個門檻，需再依循上述程序進行第三門檻之檢定。

若估計結果顯示有兩個門檻溫度，則式(2)中 β_{11} 、 β_{21} 及 β_{31} 則分別表示在溫度低於或等於 γ_1 時，氣溫、乾旱指數以及濕度分別對作物產出之影響； β_{12} 、 β_{22} 及 β_{32} 則分別表示在溫度介於 γ_1 至 γ_2 之間時，氣溫、乾旱指數以及濕度分別對作物產出之影響； β_{13} 、 β_{23} 及 β_{33} 則分別表示在溫度高於 γ_2 時，氣溫、乾旱指數以及濕度分別對作物產出之影響。亦即本研究可藉由門檻模型估計之結果，得知各種氣候條件是否會在不同門檻值之下，對作物產出有不同之影響。

IV、資料說明

本研究之目的為探討氣候門檻對全球糧食作物生產影響，而氣候變遷為全球之共同現象，因此選取資料時係以全球整體糧食產出之觀點選取，而非以單一地區資料作為本研究之實證資料建構。目前而言，單一地區之資料亦較為不完整，故亦難以建構單一地區之縱橫資料進行實證分析。此外，若以多個單一地區之資料進行分析，則更需要考量到各地區不同之特殊氣候環境以建立實證模型，因此在比較多個單一地區之實證結果時，會有估計模型不

一致之疑慮。考量上述之原因，本研究將以糧食生產主要國家做為資料選取原則進行縱橫資料建構，並以此進行實證分析，探討氣候因素對全球糧食作物生產之影響。

本研究選取兩種主要糧食作物玉米以及小麥作為分析氣候因素對作物產量影響之對象，依據聯合國糧食及農業組織 (Food and Agriculture Organization of the United Nations，以下簡稱 FAO) 之資料顯示，玉米及小麥 2009 至 2011 年累計總產量佔世界比重如表 1 所示，而本研究選取六個生產玉米之主要國家，其總產量佔全世界之玉米總產量之比例為 72.02%，其中以美國之比例 37.68% 為最高；本研究選取之五個生產小麥之主要國家，其小麥總產量約佔世界小麥產量之 47.12%，其中以中國所佔之比例 17.01% 為最高，雖然整體之小麥產量未及世界產量之一半，但若氣候變遷對這些國家之小麥產出有具體影響，亦將影響全球小麥供給之穩定，因此本研究以此五個國家作為全球小麥產出之代表。此外，再透過美國農業部 (U.S. Department of Agriculture，以下簡稱 USDA) 之世界主要糧食作物產區及氣候概況 (Major World Crop Areas and Climatic Profiles, MWCACP) 之資料選取各個國家主要盛產月份與產區經緯度中心。考量不同地理位置之不同氣候特性，為此，本研究將以玉米及小麥生產國家之地理位置條件，蒐集相近之濕度指數、乾旱指數及氣溫資料。

如表 2 所示，本研究依選取國家之經緯度位置資訊，再由國家氣候資訊中心 (National Oceanic and Atmospheric Administration，以下簡稱 NOAA)、NCAR 等資料庫蒐集相對應之經緯度之產地氣溫、乾旱指數及濕度指數之月資料，再依據表 1 之盛產月份予以平均，做為本研究氣候指數之年資料。此外，考量後續估計門檻模型要求均衡縱橫資料 (balance panel data) 之資料條件，因此玉米及小麥之資料皆以各選取樣本國家同時擁有完整最長之時間維度為準，並以此標準將資料整理為均衡縱橫資料，其中玉米之縱橫資料時間範圍為 1978 年至 2011 年；小麥之縱橫資料時間範圍則為 1973 年至 2011 年。

表 1 玉米及小麥資料之國家別、經緯度、月份選取

國家及作物別	占全球總產量 ¹	選取資料經緯度中心 ²	盛產月份 ²
作物：玉米			
美國	37.68%	北緯 41.25；西經 98.75	4、5
中國	20.93%	北緯 46.25；東經 126.25	5、6
巴西	6.33%	南緯 23.75；西經 53.75	10、11
墨西哥	2.39%	北緯 26.25；西經 108.75	5、6
印度	2.35%	北緯 16.25；東經 78.75	6、7、8
阿根廷	2.33%	南緯 31.25；西經 63.75	9、10、11
作物：小麥			
中國	17.01%	北緯 33.75；東經 118.75	10、11
印度	12.15%	北緯 28.75；東經 81.25	10、11、12
美國	8.55%	北緯 38.75；西經 98.75	9、10
法國	5.73%	北緯 48.75；東經 1.25	10、11
加拿大	3.68%	北緯 53.75；西經 103.75	5、6

資料來源：FAO（2015）；USDA（2010）。

註 1：資料來源為 FAO（2015）。

註 2：資料來源為 USDA（2010）。

表 2 變數名稱與資料來源

變數名稱	變數描述	資料來源
<i>Y</i>	每公頃作物產量（公噸）	FAO（2015）
<i>Temp</i>	溫度（℃）	NOAA（2015a）
<i>PDSI</i>	乾旱指數（PDSI）	NCAR（2015b）
<i>Humidity</i>	相對濕度（%）（選取 1000hpa 壓力層之相對濕度）	NOAA（2015b）

資料來源：本研究整理。

4.1 資料之敘述統計

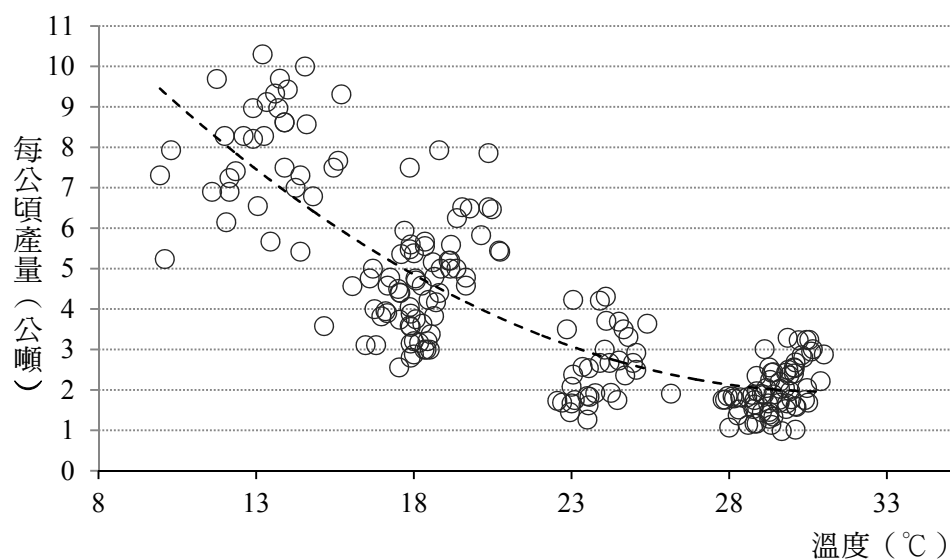
表 3 分別為玉米及小麥縱橫資料中，各變數之敘述統計值。就玉米而言，其每公頃產量平均為 3.960 公噸，產季之平均氣溫為 22.096℃；產季之乾旱指數為 0.161，顯示玉米之產季較為不乾旱；產季之濕度指數則平均為 65.722。就小麥而言，其每公頃產量平均為 3.244 公噸，產季之平均氣溫為 15.147℃；產季之乾旱指數為-0.437，顯示小麥之產季較為乾旱；而產季之濕度指數則平均為 71.553。而個別國家之敘述統計資料，則列於附表 1 及附表 2 中。

表 3 各變數資料之敘述統計

作物：玉米							
變數	平均數	中位數	最大值	最小值	標準差	偏態	峰態
<i>Y</i>	3.960	3.235	10.300	0.982	2.333	0.889	2.825
<i>Temp</i>	22.096	21.642	31.000	9.950	6.151	-0.046	1.663
<i>PDSI</i>	0.161	0.010	6.635	-6.310	2.231	0.249	3.318
<i>Humidity</i>	65.722	70.127	89.874	34.877	14.262	-0.348	1.879
作物：小麥							
<i>Y</i>	3.244	2.650	7.610	1.170	1.658	1.205	3.321
<i>Temp</i>	15.147	13.750	24.130	8.150	4.239	0.643	2.170
<i>PDSI</i>	-0.437	-0.563	4.825	-9.753	2.081	-0.315	4.066
<i>Humidity</i>	71.553	69.410	91.460	47.960	11.338	0.139	1.720

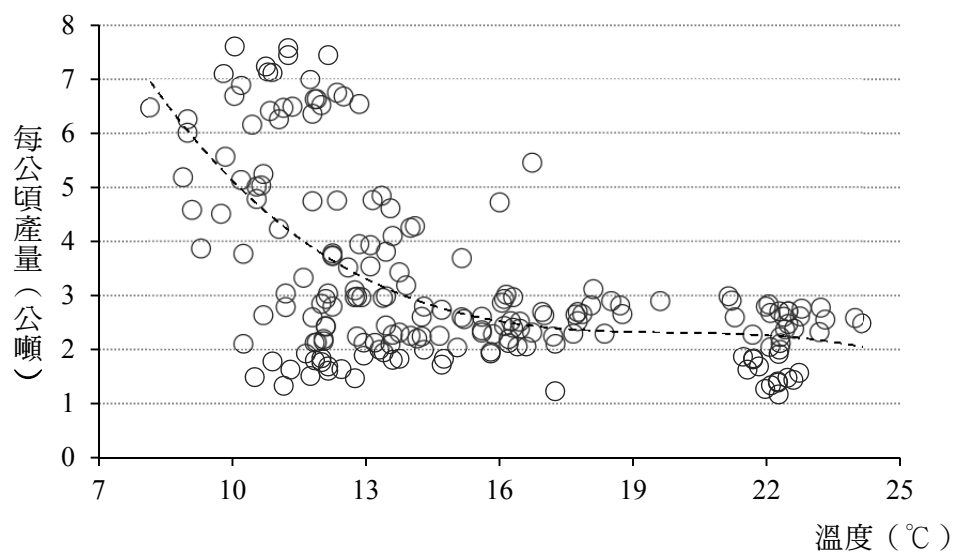
資料來源：本研究整理。

由表 3 可知，相對於玉米而言，小麥主要盛產月份之溫度較低，而乾旱程度較嚴重且相對溼度較高。此外，由圖 1 及圖 2 之趨勢線可知，玉米、小麥溫度與產量皆呈負向關係，可推測溫度升高將造成作物產量的減少。而圖 1 及圖 2 之趨勢線皆為非線性之趨勢線，因此推測氣溫與作物產量之間可能存在非線性之關係。



資料來源：本研究。

圖 1 溫度與玉米產量散佈圖



資料來源：本研究。

圖 2 溫度與小麥產量散佈圖

V、實證結果

5.1 單根檢定結果

在進行縱橫資料模型估計以及門檻模型估計之前，必須先檢定資料序列是否具有單根 (unit root)，若實證時直接使用具有單根之資料序列進行模型估計，則估計結果會有虛假迴歸 (Supurious regression) 之問題 (Granger & Newbold, 1974)。為此，本研究針對各資料序列分別透過 Levin-Lin-Chu 單根檢定 (Levin *et al.*, 2002)、Breitung 單根檢定 (Breitung, 2000)、Im-Pesaran-Shin 單根檢定 (Im, Pesaran & Shin, 2003)、ADF-Fisher 單根檢定以及 PP-Fisher 單根檢定 (Choi, 2001; Maddala & Wu, 1999) 等五種縱橫資料之單根檢定，檢測資料序列是否為定態 (stationary) 序列。若原始序列 (level) 拒絕資料序列有單根之虛無假設，表示原始資料序列為定態序列，則可直接以原始序列進行實證估計；反之，原始序列無法拒絕資料序列有單根之虛無假設，則表示原始資料序列可能為非定態 (nonstationary) 序列，須將資料進行一階差分 (first difference) 後再次進行單根檢定。若一階差分後之資料序列為定態序列，則使用差分後之資料序列進行實證估計。

依據表 4 之單根檢定結果顯示，玉米之各資料序列在 5% 信賴水準下，其原始序列之檢定結果皆拒絕序列具有單根之虛無假設，亦即所有玉米資料序列皆為定態序列。此外，小麥資料序列之檢定結果亦呈現與玉米相似之結果，小麥之各資料序列在 5% 信賴水準下，其原始序列之檢定結果皆拒絕序列具有單根之虛無假設，顯示所有小麥資料序列皆為定態序列。此結果表示若以原始之資料序列進行後續之模型實證，則實證結果應可避免虛假迴歸之問題，因此後續之模型實證將使用原始序列資料進行實證分析。

表 4 單根檢定結果^{1,2,4}

Null: common unit root			Null: individual unit root		
Test statistic					
變數	LLC t-stat	Breitung t-stat	IPS W-stat	ADF-Fisher Chi-square	PP-Fisher Chi-square ³
作物：玉米					
<i>Y</i>	-6.712 ^{***} (0-0)	-2.224 ^{**} (0-0)	-7.294 ^{***} (0-0)	70.557 ^{***} (0-0)	73.375 ^{***}
<i>Temp</i>	-10.254 ^{***} (0-1)	-6.866 ^{***} (0-1)	-8.990 ^{***} (0-1)	84.463 ^{***} (0-1)	104.435 ^{***}
<i>PDSI</i>	-9.464 ^{***} (0-3)	-4.178 ^{***} (0-3)	-8.578 ^{***} (0-3)	80.277 ^{***} (0-3)	96.650 ^{***}
<i>Humidity</i>	-10.044 ^{***} (0-0)	-8.979 ^{***} (0-0)	-10.392 ^{***} (0-0)	98.693 ^{***} (0-0)	115.248 ^{***}
作物：小麥					
<i>Y</i>	-4.989 ^{***} (0-1)	-1.843 ^{**} (0-1)	-4.277 ^{***} (0-1)	39.586 ^{***} (0-1)	33.064 ^{***}
<i>Temp</i>	-8.255 ^{***} (0-5)	-5.494 ^{***} (0-5)	-9.061 ^{***} (0-5)	83.497 ^{***} (0-5)	84.749 ^{***}
<i>PDSI</i>	-5.388 ^{***} (0-1)	-1.699 ^{**} (0-1)	-5.570 ^{***} (0-1)	46.317 ^{***} (0-1)	45.593 ^{***}
<i>Humidity</i>	-10.458 ^{***} (0-0)	-7.666 ^{***} (0-0)	-9.881 ^{***} (0-0)	89.073 ^{***} (0-0)	88.765 ^{***}

資料來源：本研究估算。

註 1：所有單根檢定模型皆包括趨勢項及截距項。

註 2：***，**分別表示在 1%，5%之信賴水準下拒絕虛無假設。

註 3：PP-Fisher 檢定採用 Bartlett 的核函數，而帶寬（bandwidth）為 Newey-West Bandwidth。

註 4：括弧內為單根檢定模型以 SIC 為準則選取之最適遞延期數。

5.2 玉米實證結果

表 5 為應用縱橫資料模型分析各氣候指標對玉米產量之影響，首先比較混合最小平方法、固定效果模型及隨機效果模型之檢定結果，以從三者中選取最適之模型，而 B-P LM 之檢定統計量為 18.688，顯示在 1% 顯著水準下

拒絕虛無假設，及截距項具隨機性，因此隨機效果模型較混合最小平方方法適合進行估計。固定效果 F 檢定統計量為 78.806，顯示在 1% 顯著水準下拒絕虛無假設，說明模型應包括固定效果項，因此固定效果模型較混合最小平方方法適合進行估計。而 Hausman 檢定統計量為 393.790，顯示在 1% 顯著水準下拒絕截距項具隨機性之虛無假設，因此固定效果模型較隨機效果模型適合進行估計。比較前述兩種檢定結果，顯示玉米的生產模型估計結果以固定效果模型為最適模型。

就固定效果模型之實證結果而言，氣溫 (*Temp*) 對於玉米產量之影響並不顯著，而乾旱指數 (*PDSI*) 與玉米產量則呈現顯著之正向關係，表示越不氣候乾旱對於玉米產量有正面之影響；濕度指數 (*Humidity*) 與玉米產量則呈現顯著之負向關係，顯示若氣候環境於玉米產季過度潮濕，則會不利於玉米之生長，而其過度潮濕之原因可能來自於洪災或是極端降雨等氣候事件；而趨勢項之係數則為顯著之正值，其背後原因可能為技術進步所導致，表示技術伴隨著時間進步將有利於玉米之生產。

接著我們應用 Hansen (1999) 提出之門檻模型，探討玉米產量與氣溫間是否存在非線性關係。首先以氣溫為門檻變數，檢定玉米產量與氣溫間是否存在門檻效果及門檻數量，接著再估計氣溫門檻值，而其結果如表 6 所示。依表 6 之門檻效果檢定結果，當氣溫 (*Temp*) 為門檻變數時，門檻效果檢定統計量 F_1 (56.651) 大於其 1% 臨界值 56.472；統計量 F_2 (27.424) 大於其 10% 臨界值 26.962；統計量 F_3 (101.316) 遠大於其 1% 臨界值 41.179，綜合三個統計量之檢定結果，顯示模型存在三個門檻效果，且其第一個門檻估計值為 15.700°C，第二個門檻估計值為 18.800°C，第三個門檻估計值為 20.700°C。而若以乾旱指數 (*PDSI*) 以及濕度指數 (*Humidity*) 分別作為模型之門檻變數，則檢定結果皆顯示模型不具門檻效果。因此依據上述之門檻檢定結果，建立以氣溫為門檻變數之參門檻模型，進一步分析不同氣溫門檻下各氣候條件對玉米產量之影響。

表 5 縱橫資料模型估計結果－玉米^{1,2}

變數	混合最小平方法	固定效果模型	隨機效果模型
<i>Temp</i>	-3.170(0.011)***	0.023(0.045)	-0.317(0.006)***
<i>PDSI</i>	0.084(0.031)***	0.041(0.020)**	0.084(0.018)***
<i>Humidity</i>	-0.019(0.005)***	-0.017(0.010)*	-0.019(0.003)***
<i>Trend</i>	0.100(0.007)**	0.083(0.004)***	0.100(0.004)***
Adj. <i>R</i> ²	0.841	0.946	0.841
模型之 F 統計量	268.632***	397.753***	268.632***
B-P LM 檢定	18.688***		
固定效果 F 檢定		78.806***	
Hausman 檢定			393.790***

資料來源：本研究估算。

註 1：***，**，*分別表示在 1%，5%，10%信賴水準下拒絕虛無假設。

註 2：括弧內為估計值之標準誤。

表 7 為玉米之單門檻模型估計結果，就氣溫對於玉米產量影響之估計結果而言，當氣溫低於 15.700℃ 以及當氣溫介於 18.800℃ 至 20.700℃ 之間時，其對於玉米產量之影響並不顯著；當氣溫介於 15.700℃ 至 18.800℃ 以及氣溫高於 20.700℃ 時，其對於玉米產量有顯著負向之影響，亦即氣溫越高越不利於玉米之生產。此門檻模型估計結果和表 5 的固定效果模型估計結果做一比較，可發現利用門檻模型更可呈現不同溫度對玉米產出影響，亦即溫度對作物產出影響透過原先計量模型估計只有一種估計結果，如正面顯著、負面顯著或者是不顯著之影響，但是實務上，溫度對作物產出的影響會因溫度水準的不同而有所不同，表 7 的溫度對玉米產出之估計結果即呈現此趨勢。

另外表 7 之實証結果也呈現在不同溫度水準下，乾旱指數和濕度對玉米產出影響幅度亦會改變。以乾旱指數為例，乾旱指數在氣溫小於 20.700℃ 時，對玉米產出的影響是正面，亦即氣候越不乾旱對於玉米之生產越有利，但是影響的幅度會因不同的氣溫水準而有所不同。溫度愈高，例如介於 15.700℃ 至 20.700℃ 之間，對玉米的影響幅度就比氣溫低時大，此表示愈高

溫加上乾旱對玉米產出影響更大。就濕度指數之估計結果而言，不論在何種溫度區間內，濕度指數之估計係數皆為顯著負值，表示玉米產季之氣候越潮濕越不利於玉米之產出，但其幅度亦會因氣溫水準而有所不同影響。

表 6 門檻效果檢定及門檻值估計結果－玉米¹

門檻變數	<i>Temp</i>	<i>PDSI</i>	<i>Humidity</i>
單門檻			
F_1	56.651	6.693	31.524
P-value	0.010	0.530	0.128
臨界值(10%, 5%, 1%)	(40.306, 45.676, 56.472)	(11.179, 12.604, 16.124)	(33.573, 40.951, 50.255)
雙門檻			
F_2	27.424	-	-
P-value	0.090	-	-
臨界值(10%, 5%, 1%)	(26.962, 30.735, 36.722)	-	-
參門檻			
F_3	101.316	-	-
P-value	0.000	-	-
臨界值(10%, 5%, 1%)	(23.568, 28.532, 41.179)	-	-
第一門檻估計值	15.700	-0.051	41.588
95%信賴區間	[15.700, 16.050]	[-3.680, 4.040]	[40.946, 42.478]
第二門檻估計值	18.800	-	-
95%信賴區間	[18.650, 23.900]	-	-
第三門檻估計值	20.700	-	-
95%信賴區間	[20.473, 23.900]	-	-

資料來源：本研究估算。

註 1：計算三次臨界值之拔靴反覆抽樣次數分別依序為 500 次、700 次及 900 次。

而時間趨勢之係數估計結果則為顯著正值，表示技術進步能帶動玉米產量之提升。對比於固定效果模型，門檻模型之估計結果能呈現在不同氣溫門檻下，各氣候指數對玉米產出之影響。因此比較兩種模型之估計結果，門檻模型之估計結果不只可將不同溫度對作物產出的影響估計而得，更可在不同

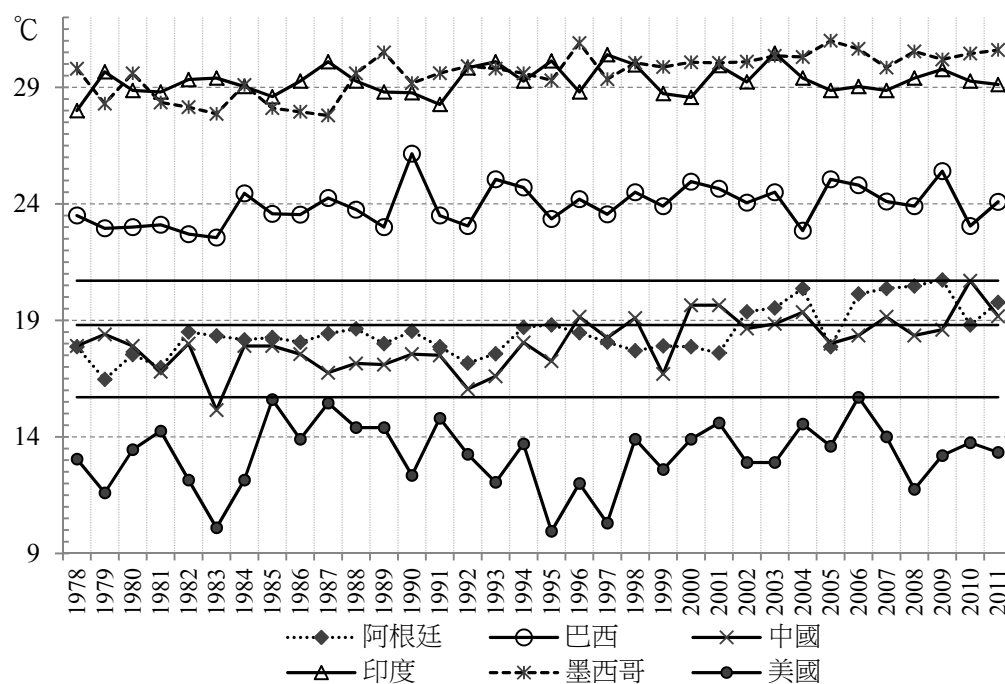
溫度水準下，評估其他氣候指標，如乾旱指數和濕度指數對作物產出的影響，不同的溫度水準下對作物產出的影響是不同，此為固定效果模型無法估計出之結果。

表 7 多門檻模型估計結果－玉米¹

門檻相依變數	估計係數	OLS S.E.	White S.E.
第一溫度區間：Temp≤15.700			
<i>Temp</i>	0.069	0.065	0.083
<i>PDSI</i>	0.155***	0.059	0.064
<i>Humidity</i>	-0.084***	0.018	0.019
第二溫度區間：15.700<Temp≤18.800			
<i>Temp</i>	-0.273***	0.067	0.063
<i>PDSI</i>	0.099**	0.054	0.046
<i>Humidity</i>	-0.034**	0.013	0.015
第三溫度區間：18.800<Temp≤20.700			
<i>Temp</i>	-0.066	0.061	0.058
<i>PDSI</i>	0.347***	0.109	0.121
<i>Humidity</i>	-0.087***	0.014	0.016
第四溫度區間：Temp>20.700			
<i>Temp</i>	-0.299***	0.033	0.050
<i>PDSI</i>	0.002	0.025	0.020
<i>Humidity</i>	-0.019**	0.007	0.009
門檻獨立變數	估計係數	OLS S.E.	White S.E.
<i>Trend</i>	0.073***	0.005	0.005

資料來源：本研究估算。

註 1：***, **分別表示在 1%, 5% 信賴水準下拒絕虛無假設。



資料來源：本研究結果。

圖 3 玉米門檻溫度與各國玉米產季氣溫分佈

若依玉米之門檻溫度區分各國之玉米產季氣溫分佈，由圖 3 可知美國歷年之玉米產季氣溫皆在第一溫度區間內，亦即乾旱及濕度對於美國玉米之產出具有顯著之影響。而 Westcott 與 Jewison (2013) 指出美國之玉米產季氣溫越高越容易伴隨乾旱現象之發生，進而造成玉米之產出減少，其研究結果與本研究之估計結果相符。此外，McCarl、Villavicencio 與 Wu (2008) 發現氣溫升高對於美國大豆之產出有顯著正向影響，然而氣溫上升對玉米之產出卻無顯著影響，其結果相似於第一區間之估計結果。

而中國及阿根廷之歷年玉米產季氣溫則同時分佈於第二溫度區間及第三溫度區間，亦即當氣溫介於 15.700°C 至 18.800°C 之間，氣溫對於中國及阿根廷之玉米產出有顯著之負向影響，平均而言，當氣溫增加 1°C 會造成每公頃玉米產出減少 0.273 公噸；當氣溫介於 18.800°C 至 20.700°C 之間，氣溫對於

中國及阿根廷之玉米產出則轉為不具顯著之影響，而乾旱及濕度對於中國及阿根廷之玉米產出之影響幅度則相對增加。此外，Wang 等人（2004）認為氣溫在 18.800℃ 前後對於中國玉米產出具有不同之影響，與本研究之估計結果相似。

巴西、印度及墨西哥歷年玉米產季之氣溫則皆位於第四溫度區間，而此區間之估計結果顯示乾旱對玉米產出無顯著之影響，濕度對於玉米產出有顯著之負向影響，然而其濕度對玉米產出之影響幅度為四溫度區間中最小。而氣溫對巴西、印度及墨西哥之玉米產出則有顯著之負向影響，當氣溫高於 20.700℃ 時，氣溫增加 1℃ 會造成每公頃玉米產出減少 0.299 公噸，其氣溫對玉米產出之影響幅度為四溫度區間中最大。

5.3 小麥實證結果

表 8 為縱橫資料模型分析各氣候指標對小麥產量之影響，首先比較 B-P LM 檢定、固定效果 F 檢定，結果顯示隨機效果模型以及固定效果模型皆較混合最小平方法適合進行估計。以 Hausman 檢定之結果，則顯示隨機效果模型為最適模型。

表 8 縱橫資料模型估計結果-小麥^{1,2}

變數	混合最小平方法	固定效果模型	隨機效果模型
<i>Temp</i>	-0.108(0.028)***	0.034(0.025)	0.031(0.025)
<i>PDSI</i>	-0.038(0.043)	0.055(0.018)***	0.054(0.018)***
<i>Humidity</i>	0.053(0.011)***	-0.026(0.008)***	-0.025(0.008)***
<i>Trend</i>	0.057(0.008)***	0.053(0.003)***	0.053(0.003)***
Adj. R^2	0.470	0.938	0.685
模型之 F 統計量	44.084***	367.040***	106.704***
B-P LM 檢定	26.850***		
固定效果 F 檢定		358.348***	
Hausman 檢定			1.942

資料來源：本研究估算。

註 1：***，**，*分別表示在 1%，5%，10%信賴水準下拒絕虛無假設。

註 2：括弧內為估計值之標準誤。

就隨機效果之結果而言，氣溫與小麥產量之間無顯著之關係；乾旱指數與小麥產量之間亦為顯著正向關係，表示氣候越不乾旱越有利於小麥生產；濕度指數與小麥產量之間則為顯著負向關係，表示當環境濕度在小麥產季過度潮濕會對小麥產出造成負面影響，而過度潮濕之原因可能為於小麥產季時發生洪災或極端降雨等氣候事件，造成環境潮濕；而趨勢項之係數則為顯著之正值，表示技術隨著時間進步有利於小麥產出。

接著再次應用 Hansen (1999) 提出之門檻模型，探討小麥產量與氣溫間是否存在非線性關係。此部分仍以氣溫為門檻變數，首先檢定小麥產量與氣溫間是否存在門檻效果及可能之門檻數量，接著估計氣溫門檻值，其結果如表 9 所示。

表 9 門檻效果檢定及門檻值估計結果-小麥¹

門檻變數	<i>Temp</i>	<i>PDSI</i>	<i>Humidity</i>
單門檻			
F_1	30.765	7.856	31.524
P-value	0.067	0.694	0.128
臨界值 (10%, 5%, 1%) (28.841, 36.950, 43.599) (21.406, 25.442, 33.609) (33.573, 40.951, 50.255)			
雙門檻			
F_2	13.290	-	-
P-value	0.444	-	-
臨界值 (10%, 5%, 1%) (21.205, 24.488, 31.080)			
第一門檻估計值	12.900	-3.457	66.750
95% 信賴區間	[12.050, 13.600]	[-3.536, 0.815]	[55.540, 86.330]
第二門檻估計值	21.130	-	-
95% 信賴區間	[9.750, 21.200]	-	-

資料來源：本研究估算。

註 1：計算兩次臨界值之拔靴反覆抽樣次數分別依序為 500 次及 700 次。

表 9 顯示當氣溫 (*Temp*) 門檻變數時，其門檻效果檢定結果指出統計量 F_1 (30.765) 大於其 5% 臨界值 28.841，亦即在 5% 之信賴水準下拒絕模型不存在門檻效果之虛無假設，而其門檻估計值為 12.900℃；接著再進一步檢

定是否有第二個門檻存在，結果顯示統計量 F_2 (13.290) 遠小於 10% 之臨界值 21.205，即無法拒絕模型只有一個門檻之虛無假設。此外，若以乾旱指數 (*PDSI*) 以及濕度指數 (*Humidity*) 分別作為模型之門檻變數，則其檢定結果皆顯示不具門檻效果。據此檢定結果，建立以氣溫為門檻變數之單門檻模型，以分析在不同氣溫門檻下，各氣候條件對小麥產量之影響。

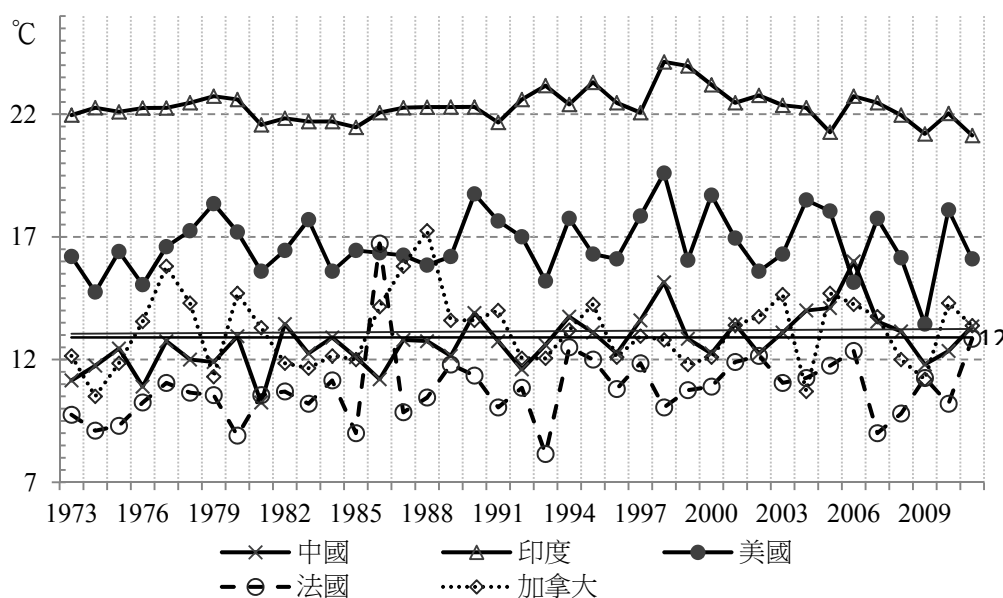
表 10 為小麥之單門檻模型估計結果，其中無論何種溫度區間之乾旱指數及濕度指數之係數正負符號皆與隨機效果模型估計之係數符號一致。結果顯示，無論在何種溫度區間，氣溫對於小麥產出皆存在顯著負向之影響，亦即氣溫越高越不利於小麥產出；而乾旱指數在兩種溫度區間之估計係數皆為顯著正值，顯示氣候越不乾旱越有利於小麥生產；就濕度指數之估計結果而言，當溫度低於 12.900°C 時，小麥產季之氣候越潮濕越不利於小麥之生產；而時間趨勢之係數則為顯著正值，意謂技術進步能增加小麥產量。綜上所述，門檻模型之估計結果能說明在不同氣溫門檻下，各氣候條件對小麥產出之影響。隨機效果模型之估計結果無法說明氣溫對於小麥產量之影響，而進一步透過門檻模型之估計結果，則可得知氣溫於不同溫度區間會對小麥產量產生不同程度之負向影響。

表 10 單門檻模型估計結果—小麥¹

門檻相依變數	估計係數	OLS S.E.	White S.E.
第一溫度區間：Temp≤12.900			
<i>Temp</i>	-0.430***	0.072	0.087
<i>PDSI</i>	0.109***	0.012	0.012
<i>Humidity</i>	-0.161***	0.043	0.049
第二溫度區間：Temp>12.900			
<i>Temp</i>	-0.132***	0.035	0.026
<i>PDSI</i>	0.056***	0.013	0.017
<i>Humidity</i>	-0.027	0.042	0.032
門檻獨立變數	估計係數	OLS S.E.	White S.E.
<i>Trend</i>	0.082***	0.006	0.007

資料來源：本研究估算。

註 1：***，**，*分別表示在 1%，5%，10%信賴水準下拒絕虛無假設。



資料來源：本研究結果。

圖 4 小麥門檻溫度與各國小麥產季氣溫分佈

此外，由圖 4 可知法國歷年之小麥生產季節氣溫大多低於 12.900°C，而依估計結果顯示當氣溫低於 12.900°C 時，氣溫、乾旱及濕度皆對小麥之產出有顯著之影響，且影響幅度皆大於第二溫度區間內各項氣候因子對小麥產出之影響，亦即相對其他國家而言，法國之氣候變化對小麥產出之影響相對敏感，若全球暖化造成氣溫上升將導致法國小麥減產，此結果與 Brisson 等人 (2010)、Licker 等人 (2013) 提出之看法相符。

加拿大及中國之歷年小麥生產季節氣溫則同時分佈於第一溫度區間及第二溫度區間，即當小麥產季平均氣溫跨越過 12.900°C 後，各項氣候因子對小麥產出之影響會產生不同之變化，例如氣溫對小麥產出之影響由每上升 1°C 會造成每公頃小麥產出減少 0.430 公噸變為減少 0.132 公噸，整體而言，氣溫之上升會造成中國小麥產量減少，此結果與 You 等人 (2009) 之研究結果一致。而美國及印度之歷年小麥生產季節氣溫則皆高於 12.900°C，因此平均

而言當氣溫上升 1°C 會造成美國及印度之小麥每公頃產出減少 0.132 公噸，同時在越不乾旱之氣候下對美國及印度之小麥產出越有利，然而濕度對於美國及印度之小麥產出則無顯著影響。而 Tack、Barkley 與 Nalley (2015) 以及 Lobell、Sibley 與 Ortiz-Monasterio (2012) 之研究結果分別說明氣溫上升將會造成美國及印度之小麥產出減少，與本研究之結果相符。

VI、結論

本研究分別以縱橫資料模型及門檻模型，估計各氣候條件對玉米及小麥產量之影響。就玉米之實證結果而言，無論是縱橫資料模型或門檻模型之實證結果，皆顯示乾旱指數對玉米產量有正面之影響，亦即在越不乾旱之氣候條件下越有利於玉米之產出；而濕度指數對於玉米產量則有負面之影響，亦即產季之氣候越潮濕越不利於玉米之產出。此外，進一步以氣溫為門檻變數檢定各氣候指數與玉米產量之間是否存在門檻效果，結果指出可以氣溫分為三個門檻（四個溫度區間）建立門檻模型，探討在不同氣溫門檻下各氣候指數對於玉米產量之影響。

結果氣溫對玉米產出之影響有三個門檻溫度，三個氣溫門檻值分別為 15.700°C 、 18.800°C 以及 20.700°C ，而氣溫對玉米產量影響之估計係數在第二及第四溫度區間皆為顯著負值，其中第二區間之係數值為 -0.273，表示當氣溫介於 15.700°C 與 18.800°C 之間時，每上升 1°C 會造成玉米產量每公頃減少 0.273 公噸；第四區間之係數值為 -0.299，表示當氣溫高於 20.700°C 後，每上升 1°C 會造成玉米產量每公頃減少 0.299 公噸。而此結果也意謂著，當全球暖化之效應而導致玉米產地之氣溫上升，將會造成全球玉米之供給減少，如此勢必得投入更多成本生產玉米，以彌補因氣候變異減產之玉米產量，否則有可能會造成全球玉米之供給不穩定。

就小麥之實證結果而言，乾旱指數與濕度指數對於影響小麥產量之估計

結果與玉米部分之實證結果相仿，無論是縱橫資料模型或門檻模型之實證結果，皆顯示乾旱指數對小麥產量有正面之影響，亦即在越不乾旱之氣候條件下越有利於小麥之產出；而濕度指數對於小麥產量則有負面之影響，亦即產季之氣候越潮濕越不利於小麥之產出。若進一步以氣溫為門檻變數檢定各氣候條件與小麥產量之間是否存在門檻效果，則結果顯示可以建立單一門檻模型（兩個溫度區間），分析在不同溫度區間內各氣候指數對於小麥產量之影響。實證結果顯示單一門檻值為 12.900°C ，當氣溫低於 12.900°C 時，氣溫上升對小麥產量有顯著之負向影響，而其估計係數為 -0.430 ，亦即氣溫低於 12.900°C 時氣溫每上升 1°C 會導致小麥之每公頃產量減少 0.430 公噸；當氣溫高於 12.900°C 時，氣溫上升對小麥產量亦為顯著之負向影響，其估計係數為 -0.132 ，亦即氣溫高於 12.900°C 時氣溫每上升 1°C 會導致小麥之每公頃產量減少 0.132 公噸。雖然結果呈現第二溫度區間氣溫之估計係數斜率值小於第一溫度區間氣溫之估計係數斜率值，但整體之結果仍表示氣溫越高越不利於小麥之生產，亦即若全球暖化效應趨於嚴重，將會導致對小麥之供給量減少。

綜合玉米及小麥之門檻模型估計結果，顯示在不同之門檻溫度下，各種氣候條件對不同地區之作物產出具有不同程度之影響。以玉米而言，若未來全球暖化使氣溫持續升高，則巴西、印度及墨西哥之玉米產出因受到氣溫上升而減少產出之影響最多，而阿根廷及中國則須注意氣溫上升後乾旱加劇會減少玉米產出之影響。以小麥而言，中國、印度、美國、法國及加拿大皆應注意全球暖化及乾旱對小麥產出之影響，其中以中國、法國及加拿大尤為氣候影響小麥產出之相對敏感地區，應更加注意全球暖化及乾旱加劇造成小麥減產之風險。

綜上所述，乾旱、洪災、降雨及全球氣溫暖化等氣候因素，都會嚴重影響玉米及小麥之產量，亦可能影響其他糧食作物之供給。本研究之主要研究貢獻在於應用計量方法找出影響作物產出之門檻溫度，再針對不同的溫度門

檻值同時評估各種氣候條件對作物產量的影響，而此估計模式可做為未來相關研究之參考。此外，由於縱橫資料為不同國家之資料構成，因此門檻模型之估計結果可同時說明各個氣候條件在不同之氣溫門檻下，會對玉米及小麥產出產生不同之影響，若依氣溫門檻分作物生產地區，則可做為不同地區國家未來擬定相關氣候變異對於農業損害調適措施之參考依據。例如中國需研擬抗旱之生產技術（節水灌溉、地膜覆蓋、植物抗旱劑及保水劑等），以因應乾旱造成其小麥及玉米減產之影響。整體而言，本研究之結果說明若全球氣溫持續暖化，將會對全球玉米及小麥之供給產生嚴重之負面影響，短期而言，世界各國應積極研擬各種氣候變異農業損害之調適措施，以因應未來氣候變異而導致作物減產之潛在可能性，而減少溫室氣體排放量以減緩全球暖化之速度，仍應為世界各國須共同追求及維繫之長期目標。

投稿日期：2015 年 10 月 2 日

接受日期：2016 年 5 月 18 日

參考文獻

- 朱蘭芬、陳吉仲、陳星瑞，2007。「台灣稻米損失函數之估計及其天然災害保險費率之計算」，『農業經濟叢刊』。13 卷，1 期，37-67。
- 朱蘭芬、陳吉仲、張靜貞，2003。「聖嬰現象對臺灣氣候之影響與預測價值之估計」，『農業經濟叢刊』。8 卷，2 期，141-178。
- 黃台心，2009。『計量經濟學』。台北：新陸書局。
- 楊純明，2007。「全球氣候變遷對農作物生產之潛在影響」，『中華民國雜草學會會刊』。28 卷，1 期，112-130。
- Abou-Hadid, A. F., R. Mougou, A. Mokssit, and A. Iglesias, 2003. "Assessment of Impacts, Adaptation and Vulnerability to Climate Change in North Africa: Food Production and Water Resources," *AIACC AF90 Semi-Annual Progress Report*. Washington: The International START Secretariat 2000 Florida Avenue. 取自 http://www.start.org/Projects/AIACC_Project/Final%20Reports/Final%20Reports/FinalRept_AIACC_AF90.pdf.
- Antle, J. M. and S. M. Capalbo, 2010. "Adaptation of Agricultural and Food Systems to Climate Change: An Economic and Policy Perspective," *Applied Economic Perspectives and Policy*. 32(3): 386-416.
- Arnell, N. W., M. J. L. Livermore, S. Kovats, P. E. Levy, R. Nicholls, M. L. Parry, and S. R. Gaffin, 2004. "Climate and Socio-economic Scenarios for Global-scale Climate Change Impacts Assessments: Characterising the SRES Storylines," *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*. 14(1): 3-20.
- Battisti, D. S. and R. L. Naylor, 2009. "Historical Warnings of Future Food Insecurity with Unprecedented Seasonal Heat," *Science*. 323(5911): 240-244.
- Breitung, J., 2000. "The Local Power of Some Unit Root Tests for Panel Data," *Advances Econometrics*. 15: 161-177.
- Breusch, T. S. and A. R. Pagan, 1980. "The Lagrange Multiplier Test and Its Applications to Model Specification in Econometrics," *Review of Economic Studies*, 47(1): 239-253.
- Brisson, N., P. Gate, D. Gouache, G. Charmet, F. X. Qury, and F. Huard, 2010. "Why Are Wheat Yields Stagnating in Europe? A Comprehensive Data Analysis for France,"

- Field Crops Research*. 119(1): 201-212.
- Burke, E. J., S. J. Brown, and N. Christidis, 2006. "Modeling the Recent Evolution of Global Drought and Projections for the Twenty-first Century with the Hadley Centre Climate Model," *Journal of Hydrometeorology*. 7(5): 1113-1125.
- Chen, C. C., B. A. McCarl, and D. E. Schimmelpfennig, 2004. "Yield Variability as Influenced by Climate: A Statistical Investigation," *Climatic Change*. 66(1-2): 239-261.
- Chen, P. Y., C. C. Chen, and C. L. Chang, 2011. "Multiple Threshold Effects for Temperature and Mortality," MPRA Paper No. 35521. Germany: Munich University. 取自 https://mpa.ub.uni-muenchen.de/35521/1/Multiple_Threshold_Effects_for_Temperature_and_Mortality_MPRA_2011.pdf.
- Christensen, J. H., B. Hewitson, A. Busuioc, A. Chen, X. Gao, I. Held, R. Jones, R. K. Kolli, W. T. Kwon, R. Laprise, V. Magaña Rueda, L. Mearns, C. G. Menéndez, J. Räisänen, A. Rinke, A. Sarr, and P. Whetton. 2007. *Regional Climate Projections*. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (847-940). Edited by S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, and H. L. Miller. New York, U.S.: Cambridge University Press.
- Choi, I., 2001. "Unit Root Tests for Panel Data," *Journal of International Money and Finance*. 20(2): 249-272.
- Dai, A., K. E. Trenberth, and T. T. Qian, 2004. "A Global Dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870-2002: Relationship with Soil Moisture and Effects of Surface Warming," *Journal of Hydrometeorology*. 5(6): 1117-1130.
- Doll, P. and S. Siebert, 2002. "Global Modeling of Irrigation Water Requirements," *Water Resources Research*. 38(4): 8-1- 8-10.
- Easterling, D. R., G. A. Meehl, C. Parmesan, S. A. Changnon, T. R. Karl, and L. O. Mearns, 2000. "Climate Extremes: Observations, Modeling, and Impacts," *Science*. 289(5487): 2068-2074.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2015. *Agri-environmental statistics*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 取自

- <http://faostat3.fao.org/download/Q/QC/E>.
- Gornall, J., R. Betts, E. Burke, R. Clark, J. Camp, K. Willett, and A. Wiltshire, 2010. "Implications of Climate Change for Agricultural Productivity in the Early Twenty-first Century," *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*. 365(1554): 2973-2989.
- Granger, C. W. J. and P. Newbold, 1974. "Spurious Regressions in Econometrics," *Journal of Econometrics*. 2: 111-120.
- Hansen, B. E., 1999. "Threshold Effects in Non-dynamic Panels: Estimation, Testing, and Inference," *Journal of Econometrics*. 93(2): 345-368.
- Hausman, J. A., 1978. "Specification Tests in Econometrics," *Econometrica*. 46(6): 1251-1271.
- Howitt, R., J. Medellin-Azuara, D. MacEwan, J. Lund, and D. Sumner, 2014. *Economic Analysis of the 2014 Drought for California Agriculture*. University of California: Davis. 取自 https://watershed.ucdavis.edu/files/content/news/Economic_Impact_of_the_2014_California_Water_Drought.pdf.
- Iglesias, A., M. Moneo, L. Garrote, and F. Flores, 2007. *Drought and Water Scarcity: Current and Future Vulnerability and Risk*. Edited by A. Garrido and M. R., Llamas. Washington, D.C.: Issues in Water Resource Policy, Resources for the Future.
- Im, K. S., M. H. Pesaran, and Y. Shin, 2003. "Testing for Unit Roots in Heterogeneous Panels," *Journal of Econometrics*. 115(1): 53-74.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007. *Climate Change*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change. 取自 https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/contents.html.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014. *Climate Change*. Rome: Intergovernmental Panel on Climate Change. 取自 <https://www.ipcc.ch/report/ar5/>.
- Just, R. E. and R. D. Pope, 1979. "Production Function Estimation and Related Risk Considerations," *American Journal of Agricultural Economics*. 61(2): 276-284.
- Kettlewell, P. S., R. B. Sothorn, and W. L. Koukkari, 1999. "UK Wheat Quality and Economic Value are Dependent on the North Atlantic Oscillation," *Journal of Cereal*

- Science*. 29(3): 205-209.
- Khasnis, A. A. and M. D. Nettleman, 2005. "Global Warming and Infectious Disease," *Archives of Medical Research*. 36(6): 689-696.
- Khor, M., 2008. "Food Crisis, Climate Change and the Importance of Sustainable Agriculture," Presentation at FAO Food Security Summit, Rome, 4 June 2008. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 取自 <http://twn.my/title2/par/mk.3jun08.on.Food.Crisis.and.Climate.Change.rev1.doc>.
- Kumar, K. K., K. R. Kumar, R. G. Ashrit, N. R. Deshpande, and J. W. Hansen, 2004. "Climate Impacts on Indian Agriculture," *International Journal of Climatology*. 24(11): 1375-1393.
- Leclère, D., P. Havlik, S. Fuss, E. Schmid, A. Mosnier, B. Walsh, H. Valin, M. Herrero, N. Khabarov, and M. Obersteiner, 2014. "Climate Change Induced Transformations of Agricultural Systems: Insights from a Global Model," *Environmental Research Letters*. 9(12): 1-14.
- Lee, C. C. and Y. B. Chiu, 2011. "Electricity Demand Elasticities and Temperature: Evidence from Panel Smooth Transition Regression with Instrumental Variable Approach," *Energy Economics*. 33(5): 896-902.
- Levin, A., C. F. Lin, and C. S. J. Chu. 2002. "Unit Root Tests in Panel Data: Asymptotic and Finite-sample Properties," *Journal of Econometrics*. 108: 1-24.
- Licker, R., C. J. Kucharik, T. Dore, M. J. Lindeman, and D. Makowski, 2013. "Climatic Impact on Winter Wheat Yields in Picardy, France and Rostov, Russia: 1973-2010," *Agricultural and Forest Meteorology*. 176: 25-37.
- Lobell, D. B. and G. P. Asner, 2003. "Climate and Management Contributions to Recent Trends in US Agricultural Yields," *Science*. 299(5609): 1032-1032.
- Lobell, D. B., M. Baenziger, C. Magorokosho, and B. Vivek, 2011. "Nonlinear Heat Effects on African Maize as Evidenced by Historical Yield Trials," *Nature Climate Change*. 1(1): 42-45.
- Lobell, D. B. and C. B. Field, 2007. "Global Scale Climate - Crop Yield Relationships and the Impacts of Recent Warming," *Environmental Research Letters*. 2(1):1-7.

- Lobell, D. B., A. Sibley, and J. I. Ortiz-Monasterio, 2012. "Extreme Heat Effects on Wheat Senescence in India," *Nature Climate Change*. 2(3): 186-189.
- Maddala, G. S. and S. W. Wu, 1999. "A Comparative Study of Unit Root Tests with Panel Data and a New Simple Test," *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*. 61(S1): 631-652.
- McCarl, B. A., X. Villavicencio, and X. Wu, 2008. "Climate Change and Future Analysis: Is Stationary Dying?" *American Journal of Agricultural Economics*. 90(5): 1241-1247.
- Motha, R. P. and W. Baier, 2005. "Impacts of Present and Future Climate Change and Climate Variability on Agriculture in the Temperate Regions: North America," *Climatic Change*. 70(1-2): 137-164.
- National Center for Atmospheric Research (NCAR), 2015a. *What Difference Can a Few Degrees Make?* Boulder: National Center for Atmospheric Research. 取自 <https://www2.ucar.edu/climate/what-difference-can-few-degrees-make>.
- National Center for Atmospheric Research (NCAR), 2015b. *Palmer Drought Severity Index, PDSI*. Boulder: National Center for Atmospheric Research. 取自 <http://www.cgducar.edu/cas/catalog/climind/pdsi.html>.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2015a. *Climate Data Online*. Washington, D.C.: National Oceanic and Atmospheric Administration. 取自 <http://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/#t=firstTabLink>.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2015b. *Earth System Research Laboratory*. Washington, D.C.: National Oceanic and Atmospheric Administration. 取自 <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.surface.html>.
- Parry, M. L., C. Rosenzweig, A. Iglesias, M. Livermore, and G. Fischer, 2004. "Effects of Climate Change on Global Food Production Under SRES Emissions and Socio-economic Scenarios," *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*. 14(1): 53-67.
- Peng, S. B., J. L. Huang, J. E. Sheehy, R. C. Laza, R. M. Visperas, X. H. Zhong, G. S. Centeno, G. S. Khush, and K. G. Cassman, 2004. "Rice Yields Decline with Higher

- Night Temperature from Global Warming,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 101(27): 9971-9975.
- Reilly, J., F. Tubiello, B. McCarl, D. Abler, R. Darwin, K. Fuglie, S. Hollinger, C. Izaurrealde, S. Jagtap, J. Jones, L. Mearns, D. Ojima, E. Paul, K. Paustian, S. Riha, N. Rosenberg, and C. Rosenzweig, 2003. “US Agriculture and Climate Change: New Results,” *Climatic Change*. 57(1-2): 43-69.
- Porter, J. R., L. Xie, A. J. Challinor, K. Cochrane, S. M. Howden, M. M. Iqbal, D. B. Lobell, M. I. Travasso, N. C. Netra Chhetri, K. Garrett, J. Ingram, L. Lipper, N. McCarthy, J. McGrath, D. Smith, P. Thornton, J. Watson, and L. Ziska, 2014. *Food Security and Food Production Systems*. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects* (485-533). Edited by C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, and L. L. White. New York, U.S.: Cambridge University Press.
- Salinger, M., 2005. “Climate Variability and Change: Past, Present and Future - An Overview,” *Climatic Change*. 70(1-2): 9-29.
- Schlenker, W. and M. J. Roberts, 2009. “Nonlinear Temperature Effects Indicate Severe Damages to US Crop Yields under Climate Change,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 106(37): 15594-15598.
- Tack, J., A. Barkley, and L. L. Nalley, 2015. “Effect of Warming Temperatures on US Wheat Yields,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 112(22): 6931-6936.
- Tao, F., M. Yokozawa, Y. Xu, Y. Hayashi, and Z. Zhang, 2006. “Climate Changes and Trends in Phenology and Yields of Field Crops in China, 1981-2000,” *Agricultural and Forest Meteorology*. 138(1-4): 82-92.
- Tompkins, E. L., E. Boyd, S. A. Nicholson, K. Weatherhead, N. W. Arnell, and W. N. Adger, 2005. “Linking Adaptation Research and Practice. A Report Submitted to Defra as Part of the Climate Change Impacts and Adaptation Cross-Regional Research

- Programme.” 取自 https://unfccc.int/files/adaptation/sbsta_agenda_item_adaptation/application/pdf/tyndall_app_30_may_ii.pdf.
- Tong, H., 1978. “On a Threshold Model,” In *Pattern Recognition and Signal Processing*. Edited by C. H. Chen. Amsterdam: Sijhoff and Noordhoff.
- U.S. Department of Agriculture (USDA), 2010. *Major World Crop Areas and Climatic Profiles, MWCACP*. Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture. 取自 <http://www.usda.gov/oce/weather/pubs/Other/MWCACP/>.
- Walther, S. and W. Abtew, 2006. “Contribution of Rainfall from Tropical Systems in South Florida,” *South Florida Water Management District, West Palm Beach*. Palm Beach, FL: Environmental Resources Department.
- Wang, R. Y., Q. Zhang, Y. L. Wang, X. G. Yang, Y. X. Han, and Q. G. Yang, 2004. “Response of Corn to Climate Warming in Arid Areas in Northwest China,” *Acta Botanica Sinica*. 46(12): 1387-1392.
- Westcott, P. C. and M. Jewison, 2013. “Weather Effects on Expected Corn and Soybean Yields,” *Economic Research Service, FDS-13g-01*, U.S. Department of Agriculture. 取自 <http://www.ers.usda.gov/media/1152952/fds-13g-01.pdf>.
- Wuethrich, B., 2000. “Ecology - How Climate Change Alters Rhythms of the Wild,” *Science*. 287(5454): 793-795.
- You, L., M. W. Rosegrant, S. Wood, and D. Sun, 2009. “Impact of Growing Season Temperature on Wheat Productivity in China,” *Agricultural and Forest Meteorology*. 149(6): 1009-1014.

附表 1 個別國家敘述統計資料—玉米

國家	阿根廷	巴西	中國	印度	墨西哥	美國
變數：Y						
Mean	4.785	2.575	4.460	1.671	2.325	7.945
S.D.	1.527	0.870	0.822	0.466	0.546	1.321
Min.	2.560	1.273	2.800	0.982	1.518	5.238
Max.	7.931	4.307	5.667	3.014	3.288	10.313
Skewness	0.482	0.509	-0.471	0.767	0.288	-0.219
Kurtosis	2.150	2.144	2.110	3.540	1.872	2.311
變數：Temp						
Mean	18.496	22.932	18.035	29.274	29.613	13.223
S.D.	1.052	0.859	1.143	0.601	0.920	13.392
Min.	16.467	22.550	15.150	28.000	27.791	9.950
Max.	20.733	26.150	20.700	30.467	31.000	15.700
Skewness	0.570	0.443	-0.151	0.179	-0.662	-0.503
Kurtosis	2.691	2.650	3.167	2.444	2.379	2.899
變數：PDSI						
Mean	-0.647	-0.167	-0.231	0.340	0.126	1.536
S.D.	1.998	2.343	1.083	1.722	2.467	2.831
Min.	-4.207	-5.040	-2.589	-3.018	-3.925	-6.310
Max.	3.057	5.070	2.235	5.055	6.635	6.600
Skewness	-0.067	0.149	0.119	0.338	0.657	-0.705
Kurtosis	2.437	2.739	2.744	3.135	3.402	3.283
變數：Humidity						
Mean	46.412	83.306	68.926	74.817	48.977	71.896
S.D.	5.940	4.461	5.803	3.078	3.831	4.076
Min.	34.877	72.523	57.020	68.748	41.588	64.253
Max.	57.794	89.874	78.844	83.311	57.944	80.111
Skewness	-0.138	-0.496	-0.052	0.380	0.210	-0.023
Kurtosis	2.096	2.427	2.201	3.450	2.742	2.289

資料來源：本研究整理。

附表 2 個別國家敘述統計資料－小麥

國家	加拿大	中國	法國	印度	美國
變數：Y					
Mean	2.150	2.248	6.104	2.191	2.527
S.D.	0.403	1.035	1.057	0.542	0.319
Min.	1.229	1.334	3.772	1.172	1.833
Max.	2.957	4.838	7.606	2.989	3.117
Skewness	0.084	-0.243	-0.613	-0.377	-0.085
Kurtosis	2.554	2.073	2.367	1.785	2.171
變數：Temp					
Mean	13.151	12.733	10.841	22.301	16.700
S.D.	1.480	1.105	1.458	0.654	1.271
Min.	10.500	10.250	10.750	21.333	13.450
Max.	17.250	16.000	16.730	24.333	19.600
Skewness	0.472	0.481	1.506	0.718	0.041
Kurtosis	3.052	4.066	8.079	3.993	2.954
變數：PDSI					
Mean	-0.887	-0.639	-0.988	-0.558	0.889
S.D.	1.984	1.655	2.495	2.035	1.641
Min.	-4.135	-4.150	-9.753	-4.647	-2.248
Max.	3.683	3.125	3.220	3.727	4.825
Skewness	0.390	0.068	-0.825	-0.022	0.229
Kurtosis	2.647	2.464	5.079	2.560	2.642
變數：Humidity					
Mean	80.103	67.070	87.349	61.835	61.405
S.D.	2.743	5.821	2.437	3.614	6.442
Min.	74.811	56.640	81.974	55.342	47.955
Max.	85.654	79.283	91.459	69.833	74.879
Skewness	-0.100	0.180	-0.113	0.190	0.132
Kurtosis	2.192	2.330	2.205	2.384	2.723

資料來源：本研究整理。

The Effects of Climate on the Global Corn and Wheat Production-An Application for Panel Data Model

Chia-Sheng Hsu^{*}, Alan Ho^{**}, Chi-Chung Chen^{***}

Many literatures have found that climate change has made significantly impacts on global supply for food crops but did not take the climate threshold into the consideration. In order to analysis the effects of climate threshold on the global food production, the effects of climate conditions including temperature, PDSI, and humidity on global corn and wheat production is estimated. We firstly apply panel data model to estimate the relationships between the production of crops and climate conditions. Furthermore, in order to observe the relationships between the crop production and climate conditions in different temperature regimes, a panel threshold model with the temperature threshold is applied.

The empirical results indicate that the positive relationship between PDSI and production of corn and wheat is found which explains a negative effect on production due to the severity droughts. The negative relationship between relative humidity and production for corn and wheat is also found which indicate that the higher humidity is harmful to production. Similarly, the negative relationship between temperature and production for corn and wheat is estimated which shows the higher temperature will have a negative impact on corn and wheat production. However, such effect of temperature on crop production is not fixed and will depend on the level of temperature. The empirical results show that three temperature thresholds for corn and one temperature threshold for wheat is found which implies that the effects of temperature on crop production need to take the threshold into consideration.

Keywords: Climate Change, Food Crops, PDSI, Panel Threshold Model

^{*} Ph. D. Student, Department of Applied Economics, National Chung Hsing University.

^{**} Associate General Manager, Golden Shares.

^{***} Professor, Department of Applied Economics, National Chung Hsing University.
Corresponding Author. Email: mayjune@nchu.edu.tw.